

## Változócsillagok az instabilitási sávban és az óriás ágon

2003-2006 (2007. június végéig hosszabbítva)

### Delta Scuti és RR Lyrae csillagok vizsgálata

1. Elvégeztük az északi ég V színszűrőben 11 magnitúdónál fényesebb, nagy amplitúdójú delta Scuti csillagainak CCD-fotometriai felmérését. A szegedi és piszkéstetői megfigyelések mellett a Sierra Nevada-i Obszervatóriumban több csillagról fotoelektromos *uvby* adatokat is felvettünk. A fő cél a programcsillagok periódusváltozásának vizsgálata a legújabb mérésekkel kiegészített évtizedes O-C diagramok alapján.

2003-ban hét nagy amplitúdójú delta Scuti csillag feldolgozását publikáltuk 6 év fotoelektromos fotometriai megfigyelései alapján. A GW UMa csillagról mi készítettük az első méréseket a Hipparcos műhold általi felfedezése óta. Az XX Cyg, DY Her, DY Peg lassú periódusváltozását megerősítettük illetve pontosítottuk annak mértékét. A BE Lyncis korábban feltételezett kettősségét az új mérések nagy valószínűséggel kizárják. A periódus kimutatott kismértékű változása látszólag felléphet a fénygörbe időszakos torzulásai miatt, amit kisamplitúdójú másodlagos pulzációs módus jelenléte okozhat.

Pontosítottuk az SZ Lyncis fényidő-effektusára ráépülő egyenletes periódusnövekedés paramétereit. A legtöbb csillag esetében jó egyezést találtunk a csillagfejlődési effektusokból eredő periódusváltozásokkal, azaz a programcsillagok többsége kimutatható evolúciós változásokon ment keresztül a mérésekkel lefedett időszakban (a 20. sz. második fele).

(Derekas, Kiss, Székely et al., 2003)

2. Az északi égen korábban végzett, a fényes nagy amplitúdójú delta Scuti pulzátorok periódusváltozására vonatkozó fotometriai felmérést kiterjesztettük hat, a déli égen látható csillagra. A Johnson-féle BVI-fotometria mellett radiális sebességeket is mértünk a Siding Spring-i Obszervatórium 2,3 m-es távcsövével. A CY Aqr és az AD CMi esetében a korábbi irodalmi adatokkal összevetve nagyon stabil fény- és radiális sebesség görbéket találtunk, azaz a két csillag pulzációja nem mutatott időbeli változást. Három csillagban (ZZ Mic, BQ Ind és RY Lep) kétmódusú pulzációt mutattunk ki, amit alacsonyrendű radiális módusokkal lehet magyarázni. Két esetben (RS Gru és RY Lep) átlagsebesség változást találtunk, amit kettős rendszerbeli keringés okoz.

(Derekas, Kiss, Csák et al., 2006)

3. Kiterjedt, minden korábbinál átfogóbb vizsgálatot végeztünk a pulzáló csillagok periódus-sugár relációjára. 233 csillag adatait felhasználva, a delta Scuti típustól a Mira csillagokig, jól látható lineáris összefüggés van a  $\log P - \log R$  diagramon. Az eltérések alapján csillagtípusonként a radiális pulzáció módusára lehet következtetni. A vörös óriáscsillagok esetében felhívtuk a figyelmet a sugár meghatározásának nehézségeire: a csillag sugara jelentősen függ a pulzáció fázisától, a szélsőtétedés hullámhosszfüggő, az infravörös tartományban erős a molekulák abszorpciója, számos csillag körül porburok alakult ki, a csillag alakja nem mindig gömbszimmetrikus, a fel nem oldott kettősség is befolyásolja a mért sugár értékét.

(Szatmáry, 2003)

4. Egy szélsőségesen erős periódusváltozású, első felhangban pulzáló RR Lyrae-csillagot fedeztünk fel a MACHO projekt által a Nagy Magellán-felhőben talált fedési kettőscsillagok között. A MACHO\*J050918.712-695015.31 jelű csillag egy 15 magnitúdós galaktikus RR Lyrae, ami a Nagy Magellán-felhő irányában látható. Az archív MACHO adatok mellett elemeztük az OGLE-III projekt friss méréseit is. Az összesített, 12 évet lefedő nagy pontosságú CCD mérések egyedi képet rajzoltak fel: 8 éves ciklushosszal modulálódik a csillag periódusa, s a relatív periódusváltozás eléri a néhány század százalékot - ez egyedülállóan nagy érték a különben igen stabil klasszikus pulzátorok között. Fénygörbéje érdekes módon teljesen stabil maradt, s a változások nem

magyarázhatók sem többszörös periodicitással, sem amplitúdómodulációval. A jelenségre nincs egyértelmű elméleti magyarázat, az észlelt periódusváltozást okozhatja kettős rendszerbeli keringés (valószínűtlen, mivel egy kb. 40 naptömegű fekete lyukra lenne szükség), illetve egy hipotetikus, erős mágneses tér ciklikus változásai.

(Derekas, Kiss, Udalski et al. 2004)

5. Tanulmányoztuk a sűrű csillagmezők CCD kamerás leképezésekor fellépő szisztematikus hibák problémáját. Ehhez bevezettünk egy egyszerű paramétert az égen egymáshoz közel elhelyezkedő csillagok látszólagos összeolvadása ("blending") által előidézett statisztikus veszteségek leírására. Levezettünk egy egyszerű formulát, amivel egy adott csillagmezőben megbecsülhetjük a blending miatt detektálatlanul maradt csillagok számát, ami átszámítható átlagos fotometriai bizonytalanságra, ha ismerjük a csillagmező luminozítás-függvényét. Bemutattuk a módszer három alkalmazását:

a) Elemeztük a Nagy Magellán-felhő (LMC) BVI szűrős fotometriai térképeit, melyek az Optical Gravitational Lensing Experiment II. mérésein alapultak. Azt találtuk, hogy a  $V \sim 18-19$  magnitúdós csillagokra akár 0,2-0,3 magnitúdót is elérheti a blending által okozott szisztematikus fényesség-hiba, ami magyarázatot ad az OGLE-II csoport RR Lyrae-kre alapozott rövid távolságskálás távolságmodulusára ( $m \sim 18,25$ ). Eredményeink szerint a hiba figyelembevételével az OGLE-II csoport távolságmodulusa hibahatáron belül megegyezik az LMC "standard" távolságmodulusával (18,5 magn.), azaz sem a kozmológiai távolságskála alappontjául szolgáló LMC-távolság, sem a levezetésére használt módszerek többsége nem szorul revízióra.

b) Megvizsgáltuk a kettőscsillagok hatását hét nóvakitörés körüli csillagmező statisztikus tulajdonságai alapján. Ehhez kétpont-korrelációs függvényeket számoltunk ki, amik arra a következtetésre vezettek, hogy a Tejútrendszerben a 10 ívmásodpercnél szorosabb optikai kettőscsillagok igen nagy hányada fizikailag is korreláló kettős rendszer. Ezzel kidolgoztunk egy módszert adott csillagmezőkben a valódi kettőscsillagok számának megbecslésére, amit alkalmaztunk az analizált klasszikus nóvákra. Két esetben (V1494 Aql és V705 Cas) azt találtuk, hogy a nóvák közelében látható halvány csillagok nagy valószínűséggel fizikailag is kötődnek a nóvarobbanáshoz, azaz ezek feltehetően hierarchikus hármas rendszerekben történtek.

c) Nagy felbontású csillagkatalógusok alapján megvizsgáltunk három fotometriai exobolygó-kereső programot blending-gyakoriság szempontjából. Azt találtuk, hogy a használt műszerek fényesség- és szögfelbontás-tartományában akár a csillagok 50-60%-a felbontatlanul maradó optikai kettőscsillag, azaz a nagyfelbontású csillagkatalógusokkal való keresztkorrelálás annyira fontos része az adatfeldolgozásnak, hogy szükséges lenne beépíteni már a legalapvetőbb adatredukálási eljárások közé.

(Kiss, Bedding, 2005)

6. Újabb méréseket végeztünk a BE Lyncis nagyamplitúdójú delta Scuti változócsillagról. Az irodalmi adatokat kiegészítve, görbeillesztéses módszerrel új O-C diagramot számoltunk, és megvizsgáltuk a görbemodellek illeszkedését, reziduáljait is. Előzetes eredményeink alapján az O-C változását a klasszikus, maximumokon alapuló O-C szórásánál jóval kisebbnek találtuk; a fénygörbe-reziduálok nem utaltak meggyőzően állandó periódusú mikrováltozások jelenlétére.

(Szakáts, Szabó, Szatmáry, 2007)

## Cefeida változócsillagok vizsgálata

1. Bekapcsolódtunk a Brera Observatóriumban (Milánó, Olaszo.) és a Konkoly Th. M. Csillagászati Kutatóintézetben dolgozó kollégák által kezdeményezett megfigyelési programba, melynek célja a több rezgési módusban pulzáló beat-cefeidák kémiai összetételének, fémtartalmának meghatározása, a pulzáció és a fémtartalom közti összefüggés tanulmányozása a pulzációs modellek tesztelésével. 16 csillagról készítettünk nagyfelbontású színeképeket az ESO chilei 2,2 m-es távcsövére szerelt FEROS spektrográffal. A fémtartalom becslésére egy programot fejlesztettünk, R.O. Gray publikus SPECTRUM kódjára alapozva. A program kb. 40 Fe I és 10 Fe II vonal mért és modellezett ekvivalens szélességét hasonlíttja össze (LTE és plánpárhuzamos atmoszféra

közelítést használva). A Nap spektrumában a vas logaritmikus gyakoriságát  $7,49 \pm 0,02$  -nek határoztuk meg, ami jól egyezik a konvencionális  $7,45 \pm 0,05$  -ös irodalmi értékkel. A vizsgált cefeidák vastartalma  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,2$  és  $+0,1$  közöttinek adódott. Megerősítettük és pontosítottuk fémtartalom és a P1/P0 periódusarány közti korrelációt: ennek alapján a kétmódusú cefeidák periódusaránya a fémtartalomnak monoton csökkenő függvénye. A Tejútrendszer beat cefeidáira kapott relációt a Magellán-felhők csillagai felé extrapolálva jó egyezést kaptunk a megfigyelésekkel. Eredményeink alapján azt a következtetést vontuk le, hogy a kétmódusú cefeidák különböző periódusarányai nem az ilyen csillagok eltérő tömegétől, vagy sugarától származnak, hanem elsősorban a különböző fémtartalomtól. Ez az empirikus felismerés jelentős lépés lehet a kétmódusú pulzáció kialakulásának megértésében.

(Sziládi, Vinkó, Poretti et al., 2006, Sziládi, Vinkó, Poretti et al., 2007, Sziládi, Vinkó, Szabados et al., 2007)

2. Kimutattuk, hogy a korábban RR Lyrae típusú változónak tekintett XZ Ceti valójában a galaktikus mezőbe tartozó anomális cefeida, azaz extrém fémszegény pulzáló szuperóriás csillag. Ehhez CCD fotometriai és spektroszkópiai méréseket végeztük a Siding Spring-i obszervatórium 1 m-es és 2,3 m-es teleszkópjaival, mellette pedig közel 3000 fotovizuális fényességmérést végeztünk a Harvard College Observatory fotólemez-archívumát felhasználva. Utóbbi adatsor lehetővé tette a csillag periódusváltozásainak detektálását 1888 és 1989 között. Eredményeink szerint a csillag több szempontból különbözik a klasszikus cefeidáktól: (i) a fénygörbéje és radiálissebesség-görbéje ciklusról-ciklusra változik; (ii) a pulzációs periódus időben nem állandó, látszólag véletlenszerű ingadozásokat mutat, bizonyos esetekben meglepően rövid időskálákon (egy-két év); (iii) a fény- és radiálissebesség-görbe amplitúdóaránya felhangú pulzációra utal, összhangban az NGC 5466 gömbhalmazban található BL Boo változóval. Utóbbi csillag volt korábban az egyetlen ismert anomális cefeida az egész Tejútrendszerben, így az XZ Ceti azonosítása fontos lépés a fémszegény populációk által dominált törpegalaxisokban nagy számban előforduló csillagtípus lokális megfelelőinek kutatásában.

(Szabados, Kiss, Derekas, 2007)

3. Megvizsgáltuk az AU Pegasi különlegesen erős periódusváltozást mutató cefeida csillag több évtizedes fotometriai adatait, melyeket publikus adatbázisokból (ASAS, Hipparcos), illetve együttműködő partnerünk saját méréseiből állítottunk össze. Megállapítottuk, hogy a csillag korábbi erős periódusváltozása 1992 után megállt, és a periódus konstans,  $P=2,411$  nap értékre állt be. A hosszú adataiból a fő periódus mellett sikerült egy kis amplitúdójú másodlagos rezgési módot is kimutatnunk. A két módus periódusaránya  $P1/P0 = 0,706$ , ami teljesen összhangban van más kétmódusú cefeida csillagok  $P1/P0$  arányával. Ez alapján az AU Pegasi egy kétmódusú cefeida, ráadásul egy olyan kettős rendszerben, melynek keringési periódusa a legrövidebb ( $P = 53,3$  nap) az ismert kettős cefeidák közül. Az AU Pegasi így egy nagyon érdekes "laboratóriumot" biztosít a pulzáció és a csillagfejlődés kapcsolatának tesztelésére.

(Jurkovic, Szabados, Vinkó, Csák, 2007)

4. Korábbi, több éven keresztül végzett szisztematikus spektroszkópiai mérésorozatunk alapján megvizsgáltuk a pulzációs mozgás eltéréseit klasszikus- és II-típusú cefeidák fotoszférájában és kromoszférájában. A fotoszféra mozgását fém- (főként semleges vas) vonalak, a kromoszféráét a H-alfa vonal Doppler-eltolódása alapján követtük nyomon. Megállapítottuk, hogy a rövid periódusú ( $P \leq 3$  nap) tartományban a II-es típusú cefeidák nagy, több 10 km/s-ot elérő sebességkülönbséget mutatnak, míg a klasszikus cefeidáknál ez a különbség sokkal kisebb. Az ennél hosszabb periódusú csillagoknál mindkét típusba tartozó csillagok hasonló mozgásokat végeznek: nagy, és kis sebességkülönbségek egyaránt előfordulnak. A  $P=10$  nap környékén a sebességkülönbség hirtelen megugrik, ami valószínűleg az ennél a periódusnál jelentkező (elméleti modellekből ismert) módusok közötti rezonanciával van kapcsolatban.

(Jurkovic, Vinkó, 2007)

## Mira és szemireguláris változócsillagok vizsgálata

1. Az aszimptotikus óriásági félszabályos és mira változócsillagok esetében irodalmi háttérkutatások szükségesek a minél hosszabb és folytonosabb vizuális fénygörbék összegyűjtésére. Ebben nagy segítséget jelentenek a különböző nemzetközi adatbázisok (AFOEV, VSOLJ, BAA VSS, AAVSO), melyek fenntartóival jó együttműködésben vagyunk már évek óta. A többszörös periodicitású félszabályos változócsillagok részletes fénygörbe-analízisen keresztül a változások minél teljesebb leírását kívántuk megadni. A hagyományos idősor-analízis módszerek mellett (pl. Fourier-analízis) az idő-frekvencia módszerek (pl. wavelet-analízis, Choi-Williams eloszlás) alkalmazása képezte a vizsgálatok alapját.

Elvégeztük az aránylag szabálytalanabb fényváltozású SRC és SRd típusú pulzáló vörös óriáscsillag adatainak összegyűjtését.

2. Megvizsgáltuk a Magellán-felhők térbeli szerkezetét a bennük található pulzáló vörös óriások periódus-fényesség (PL) relációi alapján. Az átlagos PL-relációktól való eltéréseket távolságmodulus-különbséggént értelmezve meghatároztuk több ezer vörös óriás látóirányú távolság-különbségeit az égi koordináták függvényében. Eredményeink alátámasztják a Nagy Magellán-felhőre (LMC) más módszerekkel kapott dőlt és talán görbült fősík képét: az LMC központi részének keleti vége kb. 2,4 kpc-vel közelebb található a nyugati végénél, azaz a galaxis síkja kb. 30 fokos szögben hajlik az égbolt síkjához. A magbéli héliumégető óriásági csillagok ("red clump") abszolút fényességét felhasználó módszert összevetettük a csillagközi anyag vörösödésére sokkal érzékenyebb PL-relációs eredményeinkkel, s a talált különbségek arra utalnak, hogy a "red clump" eloszlása inhomogén az LMC-n belül, azaz az LMC történetében több, térben és időben jól elkülönülő csillagkeletkezési korszak volt. A Kis Magellán-felhő (SMC) esetében összetett szerkezetet találtunk, bő 3 kpc-es távolságszórással, amire az SMC hosszúkás, látóirányban elnyúlt szerkezete ad magyarázatot.

(Lah, Kiss, Bedding, 2005)

3. Vizsgálataink során mintegy 40 SRC csillagot választottunk ki az AAVSO archívumából. Elsődleges célunk az volt, hogy ezek vizsgálatával jellemezzük a különböző frekvenciacsoportok közepes frekvenciáját, frekvenciaváltozásait, és magyarázatot adhassunk a frekvenciaváltozások okára. A teljesítmény-spektrumokban a különböző módusokhoz egy-egy "csúcserdő" tartozik, amelyet valamilyen burkoló lokalizál a jellemző frekvencia körül. Itt tehát nem az egyedi csúcsok tulajdonképpen véletlenszerű elhelyezkedését kellett jellemezni, hanem a csúcsok burkolójának jellegét. Ezért a "csúcserdő" kvantilis-analízisen keresztül határoztuk meg a frekvenciákat és a változékonyságokat. Eredményeink szerint ezekben a csillagokban a pillanatnyi pulzációs frekvencia jellemzően akár 10%-ot is változhat; a pillanatnyi frekvenciák alapján tehát nem tudjuk a csillag legjellemzőbb paramétereit meghatározni. A pulzáló módushoz tartozó frekvenciacsoport jellege több esetben Lorentz-profil követ. Ez azt bizonyítja, hogy a megfigyelt frekvenciaváltozások a pulzációs fázis sztochasztikus változásának eredménye. E módusok élettartama a Lorentz-profil kiszélesedésével fordítottan arányos, az időskála a csillagmodellek által jóslott konvekciós makrocellák élettartamával azonosítható. Így tehát a frekvencia változásainak okát a konvekcióban jelölhetjük meg. Ennek a modellnek további bizonyítéka, hogy ezen csillagok esetében a teljesítményspektrum pulzációs frekvenciákon kívül lévő része  $1/f$  zaj jellegű. A W Persei esetében a fényváltozásnak nincs is pulzációs komponense, a megfigyelt fényváltozás teljes egészében  $1/f$  jellegű zaj.

(Kiss, Szabó, Bedding, 2006)

4. A MACHO adatbázisból közel 6000 hosszú periódusú változócsillagot választottunk ki, hogy a csillagok periódus-fényesség relációját nagy számú, azonos távolságban lévő csillag segítségével tanulmányozhassuk. Célunk az volt, hogy a többszörös szerkezetű (A, B, C, D, E szekvenciák) P-L relációkhoz tartozó csillagok viselkedését (amplitúdók, színváltozások) egymáshoz viszonyítva magyarázatot adjunk a szekvenciákban megfigyelhető fényváltozások okára. Az összes csillag esetében újra meghatároztuk a periódusokat, és minden esetben manuálisan ellenőriztük, hogy valóban a jellemző periódust találtuk meg (a kettőscsillagok miatt ez különösen szükséges volt).

Eredményeink szerint a P-L reláció szerkezete ötszörös tagozódást mutat, a korábbi irodalmi

adatokkal összhangban. A korábbi E szekvencia a pontos periódusmeghatározás után eltűnik - a szekvencia csillagai túlnyomórészt ellipszoidális változók, és esetükben a valós periódus felét adta az automatikus Fourier-analízis. Javasoljuk az E szekvencia nevezék megtartását az ellipszoidális változókra. A csoport a korrekt periódussal följajzolva átfedést mutat a D szekvencián található LSP változókkal, bár jellemzően halványabbak azoknál. A legrövidebb periódust mutató csillagoktól is rövidebb periódussal változó szekvencia jelenlétét mutattuk ki az A szekvenciától balra, amelyet A' jelöléssel láttunk el - itt magasabb felhangon pulzáló változók helyezkednek el. Összehasonlítottuk az E (ellipszoidális változók) és a D (LSP csillagok) szekvenciáit, és úgy találtuk, hogy formálisan hasonló PL-relációt követnek - ez az LSP jelenség kettős eredetére utal. Azonban az amplitúdó-fényesség és a színváltozás-amplitúdó diagramokon e két szekvencia látványosan különvlik. Figyelemre méltó, hogy a C szekvencia (alaplódusú pulzátorok) a D szekvenciához sokkal közelebbi eloszlást mutat ezeken a diagramokon, ami viszont az LSP változások pulzációs eredetére utal.

(Derekas, Kiss, Bedding et al., 2006)

5. 30 darab, kettős poszt-AGB csillag több évre terjedő fotometriai adatsorait választottuk ki az ASAS és NSVS változócsillag-megfigyelések adatbázisából, részletes analízis céljából. Meghatároztuk a csillagok periódusát és amplitúdóját, 17 esetben mi szolgáltatunk először adatot az irodalomban. Ezek között 5 kettős, 5 RVa, 7 RVb, 3 II. típusú cefeida és 9 további pulzáló (több módusú szemireguláris vagy zajos) csillagot találtunk. Talán legfontosabb eredményünk e témában, hogy kimutattuk a pulzáció amplitúdójának függését a hőmérséklettől. A legnagyobb amplitúdójú pulzátorok 5000-6000 K között találhatók, és itt egymódusú pulzációt láthatunk. Ennél kicsit kisebb és nagyobb hőmérsékleteken a pulzáció félszabályos vagy zajos jellegű, és kis amplitúdójú, az instabilitási sávon kívül pedig főleg kettős változócsillagokat találunk. A megfigyelések jó összhangban vannak a csillaglégkör gerjesztettségének állapotával. Az instabilitási sávot az elmélet által jósolt pozícióhoz hasonló helyzetben találtuk, bár hőmérséklete talán valamivel kevesebb az elméleti modellnél. A vizsgáltak közül kiemelhető két különleges csillag. Az ST Puppis gyors periódusváltozásokat mutatott, a megfigyelések időszaka alatt 18,4 napról 19,2 napra növekedett. Ez a csillagról a XX. században 17,5 és 19,2 nap közötti periódusokat publikáltak, ám a periódus mostanában megfigyelt gyors változásait korábban nem tapasztalták. A másik említésre méltó csillag az IRAS 11472-0800 II. típusú cefeida, amelynek O-C diagramja alapján a maximum fázisa látszólag periodikusan, 10 nap teljes amplitúdóval és kb. 1200 nap periódussal változik. Ez egy kísérő komponensre utalhat, ez azonban nem nagyon valószínű, mert a kiszámolható pálya nagy tömegű fekete lyukat feltételezne a rendszerben. A megfigyelt változások a maximum fázisának véletlen változásaival is magyarázható, megjegyezve, hogy ez az eddigi megfigyelések rövid ideje alatt periodikusnak bizonyult. Mindenképpen szükséges a csillag további megfigyelése.

(Kiss, Derekas, Szabó et al., 2007)

## Csillaghalmazok és változócsillagaik vizsgálata

1. CCD fotometriai és optikai spektroszkópiai megfigyeléseket végeztünk a Kis Magellán-felhő irányában található NGC 362 galaktikus gömbhalmazról. Kb. tízezer csillag idősormérései alapján nagy számú változócsillagot fedeztünk fel a halmazban, köztük 23 RR Lyrae típusú csillaggal. Az RR Lyrae-kre vonatkozó fénygörbe-fémesség és fénygörbe-luminozitás relációkat felhasználva meghatároztuk az NGC 362 átlagos fémességét, melynek értéke  $[Fe/H] \sim -1,3$  az Oosterhoof-I típusú halmazokra jellemző. Két RR Lyrae-csillagban erős Blazsko-effektust találtunk, ami a fénygörbe jól lokalizált fázisainak modulációjaként jelentkezett.

(Székely, Kiss, Csák et al., 2005, Székely, Jackson, Kiss, Szatmáry, 2006, Székely, Kiss, Jackson et al., 2007)

2. Elvégeztük az M38 - NGC 1907 valószínűsített dinamikai kettős nyílthalmaz vizsgálatát. 999 csillag radiális sebessége alapján mindkét halmazban nagy (4 km/s körüli) sebességszóródást találtunk, ellentétben a halmazok kora (250 és 400 millió év) alapján várható, relaxálódott halmazokra jellemző 1,5 km/s vagy kisebb sebességszóródással. Ez arra utalhat, hogy a két

halmaz valóban gravitációs kölcsönhatásban áll. A két halmazban 17 változócsillagot találtunk, leginkább fedési kettősöket és delta Scuti pulzátorokat. (Szabó, Fűrész, Székely, Szentgyorgyi, 2006)

3. A 3,9 méteres Angol-Ausztrál Távcsővön a közelmúltban üzembe helyezett AAOmega nevű multi-objektum spektroszkóppal közepes felbontású közeli infravörös spektrumokat vettünk fel 10500 csillagra öt (47 Tuc, M12, M30, M55 és NGC 288) gömbhalmazban és azok környezetében. A radiális sebességmérés pontossága keresztkorrelációs módszerrel 1 km/s körüli, emellett szintetikus modell spektrumok illesztésével minden csillagra megbecsültük a fémességet, az effektív hőmérsékletet, a felszíni gravitációt és a forgási sebességet. A sebesség térképek és a halmaztag csillagokra vonatkozó sebesség diszperziók analízise felfedte négy halmaz esetében a rendszer forgását.

(Székely, Kiss, Szatmáry et al., 2007, Kiss, Székely, Bedding et al., 2007)

**Egyéb, a pályázat által támogatott kutatások** (ezek témája csak részben kapcsolódik a pályázat fő irányvonalaihoz, azonban a jelen finansziális helyzetben lényegében csak ez az OTKA támogatja az egész szegedi kutatócsoport munkáját, ami az összes változócsillag típusra, csillaghalmazokra és a kisbolygókra is kiterjed)

## Nóvák és szupernóvák vizsgálata

1. Közel egy éven keresztül követtük a Nova Sgr 2003/1 = V4745 Sgr klasszikus nóva kitörését, és spektroszkópiai fejlődését a maximum utáni 10 hónapban. Adataink új fényt vetnek a gyors nóvák maximumát követő fénygörbe-oszcillációk (az ún. tranzíciós fázis) fizikai magyarázatára. A csillag érdekessége, hogy az ún. tranziens nóvák tipikus példánya, aminek a fénygörbéje a kitörés maximuma után ismétlődő kis kitöréseket mutatott egyre növekvő visszatérési idővel. Ezen kis kitörések fizikai természete lényegében ismeretlen, s a szakirodalomban több versengő modell is található a jelenségről. Ausztráliában és Izraelben elvégzett spektroszkópiai méréseink szerint a kis kitörések alatt a csillag spektruma a korai nóvarobbanásra jellemző spektrumvonalat tartalmazott, amit úgy értelmeztünk, hogy utórobbanásokat láttunk, melyek során a fehér törpe főkomponens felszínéről egyre csökkenő mennyiségű anyag repül le. A jelenség hátterében feltehetően pulzációszerű aktivitás áll, ami rezonáns módon gerjesztődik a fehér törpe felszínét takaró, a kitörés utáni hónapokban még energiát termelő hidrogénrétegben. (Csák, Kiss, Retter et al., 2005)

2. Befejeztük a SN 2004dj II-P típusú szupernóva spektroszkópiai és fotometriai vizsgálatát, a szupernóva felfedezése utáni közel 3 év alatt gyűjtött megfigyelési adatokra alapozva. A fénygörbéből megállapítottuk, hogy a fotoszférikus fázis a robbanás után kb. 100 nappal ért véget. Az ezen időszak alatt készült spektrumaink modellezéséből H, Na, Fe, Sc, Ti és Ba jelenlétét mutattuk ki. A szupernóvára két módszerrel új távolságot határoztunk meg (3,75 és 3,66 Mpc), ami kicsit nagyobb, mint a szülő galaxis korábban ismert távolsága. A szupernóva robbanás előtti képeinek fotometriájából megszerkesztettük a szülő objektum (a Sandage-96 jelű kompakt csillaghalmaz) spektrális energiaeloszlását. Ezt összevetettük különböző modellszámítások jóslataival, amiből kimutattuk, hogy a halmaz valószínű kora 8 és 20 millió év között van. Amennyiben a 8 millió éves életkor a helyes, a szupernóva kezdeti tömege kb. 23 - 25 naptömeg kellett, hogy legyen, ami mindezidáig a legnagyobb tömegű ismert szupernóva progenitor. (Vinkó, Takács, Sárneczky et al., 2006)

3. Az M51-ben feltűnt SN 2005cs jelű szupernóva távolságát irodalmi fotometriai és spektroszkópiai mérések felhasználásával pontosítottuk, a Táguló Fotoszféra Módszert használva. Eszerint a szupernóva (és a galaxis) távolsága  $7,1 \pm 1,2$  Mpc, ami jó egyezésben van az M51-re vonatkozó modern távolságmérési eredményekkel. A pontos távolság és a szupernóva mért adatai felhasználásával becslést adtunk a progenitor objektum fizikai paramétereire. Ezek alapján a szülő objektum tömegére 9 naptömeg adódott, ami megerősíti a korábbi irodalmi eredményeket.

(Takáts, Vinkó, 2006)

4. Publikus adatok alapján megvizsgáltuk fényes Ia-típusú szupernóvák intersztelláris vörösödésének meghatározási módszerét, az ún. Lira-Phillips relációt. Ez az empirikus módszer a szupernóva B-V színindexének menetét vizsgálja a robbanás utáni 30 - 90 nap között. Ez ugyanis a megfigyelések alapján jó közelítéssel lineáris, monoton csökkenő függvény. A módszert úgy teszteltük, hogy különböző kritériumokat felállítva egy homogén, vörösödésmentes mintát állítottunk össze fényes Ia-típusú szupernóvákból (14 ilyen objektumot találtunk). Ezek B-V görbéje a 30 - 90 napos intervallumon a Lira-Phillips reláció szerint kell, hogy változzon. Azt találtuk, hogy a reláció meredeksége ugyanaz, mint azt korábban, mindössze 5 objektum alapján meghatározták, a zérus ponti tag viszont 0,05 magnitúdóval nagyobb. A pontok szórására viszont 0,3 magnitúdó adódott, ami bizonyosan nem megfigyelési hiba, hanem inkább a szupernóvák eltérő B-V görbéjére vezethető vissza. Eredményeink alapján a Lira-Phillips reláció statisztikusan valóban alkalmas a vörösödés becslésére, azonban a módszer szisztematikus hibával terhelt, ami elérheti a 0,1 - 0,2 magnitúdót is. (Sipos, Vinkó, 2006)

5. Számítógépes programot fejlesztettünk a II-P típusú szupernóvák távolságának meghatározására szolgáló Táguló Fotoszféra Módszer alkalmazásához. A program és a módszer tesztelésére az irodalomban elérhető összes mérési adatot összegyűjtöttük, és kiegészítettük saját méréseinkkel. Kimutattuk, hogy a módszer a robbanás utáni 5 és 50 nap között készült mérésekből megbízható távolságokat ad, ellentétben néhány szerző korábbi állításával. A módszer hibája összemérhető az Ia-típusú szupernóvák távolságmérési eljárásainak hibájával, ami egy nagyon fontos ellenőrzési lehetőséget biztosít a nagy vöröseltolódású szupernóvák távolságskálájára. (Vinkó, Takáts, 2007)

6. A SN 2004et II-P típusú szupernóváról közvetlenül a robbanás utáni néhány napban készítettünk optikai spektrumokat a David Dunlap Obszervatóriumban. A korai spektrumokból a maradvány tágulási sebességére  $14,900 \pm 600$  km/s-ot határoztunk meg (a H-alfa vonal abszorpciós minimumának Doppler-eltolódásából). Ez az eredmény fontos információval szolgált a későbbi, rádiótartománybeli VLBI-mérések értelmezéséhez, melyet együttműködő partnereink készítettek. Ezek alapján a SN 2004et rádiósugárzása egy rádiósugárzó héjból származik, melyen két "forró", erősen rádiósugárzó folt helyezkedik el. Hasonló konfigurációt figyeltek meg annak idején az SN 1993J-nél is. (Marti-Vidal, Marcaide, Alberdi et al., 2007)

## Kettőscsillagok vizsgálata

1. Új megköteéseket találtunk a nagy tömegű röntgenkettős V4641 Sagittarii ismétlődő kitöréseit leíró elméleti modellekre. 2004. július 4. és 2005. március 28. között 19 éjszaka vettünk fel optikai spektrumokat a kb. 10 naptömegű fekete lyukat tartalmazó rendszerről, melyek alapján kimértük a másodkomponens pályamenti radiális sebesség görbét a rendszer nyugalmi állapotában. A 2004. július 4-i kis kitörés során a csillag kb. 3 magnitúdós kitöréssel ment keresztül, aminek nagy részét sikerült lefednünk a Siding Spring-i Obszervatórium 2,3 m-es távcsövével készített spektrumokkal. A kitörés legelején P Cygni-profilú emissziós vonalakat találtunk, melyek néhány órával később eltűntek. Ezek alapján a kitöréssel járó anyagledobódás gyors változásokon esett át. A spektrum legfőbb jellemzői nagy mértékben hasonlítottak az 1999. szeptemberi nagy kitörés alatt észleltekhöz, azaz az évente ismétlődő maximumokat hasonló robbanásszerű fizikai folyamatok okozzák. Nyugalmi állapotban csak a másodkomponens B-csillag spektruma látszik, ami mutatja a 211 km/s keringési sebességgel járó periodikus Doppler-csúszást. A rendszer kinematikailag becsült távolsága legalább 6,3 kpc. (Lindstrom, Griffin, Kiss et al., 2005)

2. Öt W UMa típusú kontakt kettős rendszer fotometriai megfigyelése alapján elvégeztük periódus analízisüket. Négy csillagnál szekuláris periódusváltozást találtunk. Az AB And, OO Aql és U Peg esetében kvázi-színuszmodulációt mutattunk ki a periódusban, amit fényidő-effektussal vagy mágneses jelenségekkel magyarázhatunk. Az O-C diagrammok kisamplitúdójú, 18-20 éves

hullámjai az RS CVn rendszerekben megfigyelhető mágneses ciklussal analóg módon értelmezhetők.

(Borkovits, Elkhateeb, Csizmadia et al., 2005, Borkovits, Csizmadia, Nuspl, Bíró, 2006)

**3.** Vizsgálataink során szoros kettőscsillagokról készített fotometriai és spektroszkópiai mérések alapján meghatároztuk a fontosabb fizikai paramétereket, majd következtetéseket tettünk a csillagok fejlődési állapotára, a felszíni aktivitás mértékére, valamint egy lehetséges harmadik komponens jelenlétére.

A déli égbolton található öt csillagról 2004 és 2005 között készültek mérések az ausztráliai Siding Spring Observatóriumban. Ezek között található egy ismert, többször modellezett kettős (XY Leo) és egy másik kutatócsoport által párhuzamosan vizsgált objektum (VZ Lib) is, míg három szoros kettőscsillagnak (DX Tuc, QY Hya, V870 Ara) korábban még nem határozták meg a fizikai ill. geometriai jellemzőit. A modellezés során egy általánosan elterjedt, FORTRAN nyelvű programot, a Wilson-Devinney kódot használtuk.

Az adatokból kinyert fénygörbékből új minimumidőpontokat határoztunk meg és pontosítottuk a keringési periódusidőket. A komponensek radiális (látóirányú) sebességgörbéinek analizéséből spektroszkópiai tömegarányokat számoltunk. A WD-kód segítségével meghatároztuk az objektumok abszolút fizikai paramétereinek (tömeg, sugár, effektív hőmérséklet, luminozitás) értékét, s elkészítettük a rendszerek geometriai modelljeit. A kinyert adatokból kiszámoltuk az égitestek tőlünk mért távolságát - az eredmények jó egyezést mutattak a Hipparcos műhold által mért parallaxisok értékeivel. Becslést tettünk a csillagok felszíni aktivitásának (folttevékenység) mértékére. Egy esetben kimutattuk, hogy a szoros kettős rendszert egy távolabbi, harmadik komponens egészíti ki; míg két esetben megerősítettük az ilyen irányú, korábbi felfedezést.

(Szalai, Kiss, Mészáros et al., 2007)

## **Halmazok, felhők, csillagképződés infravörös vizsgálata**

**1.** Elvégeztük az NGC7538 jelű HII régió feltérképezését közeli infravörösben az arizonai Fred Whipple Observatórium 1,5 m-es távcsövével. A 2,2 mikronos mérések felfedtek egy eddig ismeretlen fiatal beágyazott halmazt a régió dél-nyugati részén. JHK észleléseink alapján megbecsültük a terület vörösödési törvényét és több mint 200 infravörös színtöbbllettel rendelkező csillagot azonosítottunk. A terület szín-fényesség diagramja alapján alsó becslést adtunk a halmaz távolságára ill. vörösödésére. A kezdeti tömegfüggvényből megbecsültük a halmazban található csillagok össztömegét és a kapott eredményt összehasonlítottuk más halmazokra kapott értékekkel.

(Balog, Kenyon, Lada et al. 2004)

**2.** A 2MASS képein újonnan felfedezett 346 beágyazott csillaghalmazból vizsgáltunk meg 20-at a Fred Lawrence Whipple Observatory STELLRCAM infravörös kamerájával JHK színszűrőkkel. A megfigyelések segítségével a 2MASS méréseknél jelentősen jobb felbontást sikerült elérnünk, illetve sok új halvány objektumról gyűjtöttünk adatot. A közeli infravörös adatokat kétszín diagramon ábrázolva elkülönítettük a fősorozat előtti (PMS) csillagokat a fősorozatiaktól, s megvizsgáltuk ezen csillagok térbeli eloszlását. A PMS csillagok arányából megbecsültük a halmazok korát. A 20 halmazból 13-nál megerősítettük a beágyazott halmaz jelenlétét, 5-nél továbbra is kérdéses a létezésük, míg a maradék 2-nél biztosan nem található a közeli infravörös hullámhossz-tartományban beágyazott csillaghalmaz.

(Gáspár, Balog, Makai et al., 2005)

**3.** Elvégeztük a Lynds 1333 közeli molekulafelhőhöz tartozó fiatal csillagok közepes felbontású spektroszkópiai megfigyeléseit. Felfedeztünk négy új T Tauri típusú csillagot, melyek közül kettő tagja vizuális kettős rendszernek, és egy új Class I forrást (IRAS 02086+7600). Kombinált spektroszkópiai és fotometriai adatok segítségével megbecsültük az új T Tauri csillagok tömegét és korát, valamint felvázoltunk egy lehetséges forgatókönyvet a felhőben lejátszódott csillagkeletkezésre.

(Kun, Nikolic, Johansson et al., 2006)



4. Együttműködésben az Arizona egyetem Steward Observatóriumának kutatóival megvizsgáltuk a Spitzer/MIPS GTO (58-as program: "Evolution and Lifetimes of Protoplanetary Disks") keretében készült 24 mikronos felvételeket, melyek fiatal masszív halmazokat tartalmaztak. Ezeken a képeken felfedeztünk 3 üstökös-szerű struktúrát, melyek közös tulajdonsága, hogy O színeképtípusú csillag közelében találhatóak és az "üstökös farka" az O csillagtól radiális irányban kifelé mutat. A 24 mikronos fényességprofilok modellezése alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy az objektumok fiatal csillag körüli anyagkoronggal rendelkező csillagok, melyek korongjából az O csillag fénynyomása távolítja el a port. Az eredményről a Spitzer Science Center és az Arizona Egyetem is sajtóközleményt bocsájtott ki "Planets prefer safe neighborhood" címmel (<http://www.spitzer.caltech.edu/Media/happenings/20061003/>) (Balog, Rieke, Su et al., 2006)

5. Nemzetközi együttműködés keretében bekapcsolódtunk az AA Tau klasszikus T Tauri típusú csillag fotometriai és spektroszkópai megfigyeléseibe. Sikertelenül kimutatnunk a térbeli kapcsolatot az akkréciós korong belső szélé, a mágneses erővonalak mentén a csillagra áramló anyag ill. a csillag felületén keletkezett akkréciós "shock" között. (Bouvier, Alencar, Bouvier et al., 2007)

6. Szintén a 4. pontban említett együttműködés keretében feldolgoztuk az NGC 2244 nyílthalmazról készült Spitzer felvételeket. Statisztikai módszerekkel kimutattuk, hogy a forró, nagy tömegű csillagok csak a közvetlen környezetükben vannak hatással a közelükben lévő kisebb tömegű csillagok korongjaira. Az eredményről a Spitzer Science Center és az Arizona Egyetem is sajtóközleményt bocsájtott ki "Astronomers Map Out Planetary Danger Zone" címmel (<http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2007-08/index.shtml>) (Balog, Muzerolle, Rieke et al., 2007)

7. A Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics és a Steward Observatórium kutatóival együttműködve a 4. pontban említett Spitzer/MIPS GTO program keretében észlelt  $h$  &  $\chi$  Persei ikerhalmaz Spitzer-adataiból kimutattuk, hogy a 10 millió év körüli halmazokban a csillagközi anyagkorongok gyakorisága függ a tömegtől és attól, hogy milyen hullámhossztartományon vizsgáljuk a halmazt. Eredményeink azt mutatják, hogy minél kisebb a csillag tömege, annál valószínűbb körülötte anyagkorong jelenléte. Szintén érdekes eredmény, hogy a korongok jobban kimutathatók a hosszabb hullámhosszakon, amiből arra következtethetünk, hogy a korong eltűnése a csillagtól indulva belülről kifelé történik, azaz a csillaghoz legközelebbi részek tűnnek el először majd folyamatosan a többi rész is. (Currie, Balog, Kenyon et al., 2007)

8. A Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (USA) kutatóinak projektjébe bekapcsolódva vizsgáltuk a TW Hydrae nevű, klasszikus T Tauri csillagot. Fő feladatunk a spektroszkópai mérések kiértékelése és értelmezése volt. Vizsgálataink elsősorban a csillag anyagkiáramlásaira, illetve ezek színeképi sajátosságaira koncentráltak. Az elsődleges feladat a  $H\alpha$  vonal alak-, centrális hullámhossz- és fluxusváltozásainak elemzése volt, melyek segítségével következtetéseket vonhattunk le a csillagszél és az akkréció változásáról. Ezeket a vizsgálatokat később a He I, a Ca II H és K, valamint a Na I(D1) és a Na I(D2) emissziós vonalak esetében is elvégeztük. A felsorolt fizikai paraméterek közül többen sikerült kimutatni rövidtávú változásokat; egyes vonalak esetében ( $H\alpha$ , He I) pedig egy lehetséges korrelációt is találtunk a vonalak alatti integrált fluxusok változása és az irodalomban közölt fotometriai periódusidő között. (Dupree, Avrett, Brickhouse et al., 2007)

9. A Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics és a Steward Observatórium kutatóival együttműködve elvégeztük a  $h$  &  $\chi$  Persei ikerhalmazban talált 8 erős ill. közepes infravörös excessszal bíró csillag további vizsgálatát. Optikai spektroszkópai adatok és szélessávú fotometria alapján konstruált spektrális energiaeloszlás és modellszámítások segítségével megmutattuk, hogy a vizsgált csillagok körüli törmelékgyűrű valószínűleg Föld típusú bolygók keletkezésekor lejátszódó folyamatok eredménye. (Currie, Kenyon, Rieke et al., 2007)

10. 2004 végén optikai spektroszkópai méréseket végeztünk a V1647 Ori (McNeil-objektum) fiatal eruptív változócsillagról és reflexiós ködjéről. A lassú lefutású kitöréssel párhuzamosan a H-alfa vonal fluxusának csökkenését mértük a Siding Spring-i Observatórium 2,3 m-es távcsövével felvett színeképekben. A csillag részletes vizsgálatait az MTA KTM Infravörös Kutatócsoportja végezte el.  
(Acosta-Pulido, Kun, Ábrahám et al., 2007)

## Kisbolygók és üstökösök vizsgálata

1. A Sloan Digitális Égboltfelmérés adataiban 1187 mérést azonosítottunk trójai kisbolygókkal. Kisebb hányaduk már ismert kisbolygót mutat, és a pályaelemek alapján lehetett őket kiválasztani. A többség, 860 megfigyelés még ismeretlen, fel nem fedezett égitestet ábrázol. Az 1187 mérésből álló minta végül – becslésünk szerint – az SDSS által megörökített felfedezettlen trójai kisbolygók 60%-át tartalmazza, másrészt a minta legalább 97%-a valóban trójai kisbolygó. Így sikerült közel megkétszerezni az eddigi adatok számát, ám a szükséges minőségi kritériumokat is tekintetbe véve, a részletesen vizsgálható égitestek száma az eddigieknek mintegy ötszörösére nőtt. A minta a kisebb méretű égitestek esetében is bővebb: a korábbi legalább 20-30 km-es átmérő korlátjával szemben a 10 km-nél nagyobb égitesteket az SDSS-sel már mind azonosítani lehetett.

Az eredmények szerint a Jupiter trójai kisbolygócsaládja nagyságrendileg ugyanannyi (mintegy egymillió) 1 km-nél nagyobb kisbolygót tartalmaz, mint ahány ilyen égitest a kisbolygók főövében (harminc népes családjában és a szórt populációban összesen) van. A vezető, L4 csoportban egyértelműen több, mintegy 1,6-szor annyi kisbolygót találunk, mint a követő L5 csoportban. Ez az eltérés vagy abból származik, hogy az L4 csoportba már kialakulásakor több égitest került, vagy arra kell gondolnunk, hogy a Naprendszer történetének folyamán valamely hatás, például a Szaturnusz pályájának változása az égitestek nagyobb hányadát szórta ki az L5 csoportból. Az SDSS-adatokból kimutatható, hogy a trójai kisbolygók színe nem független a pályahajlástól: magasabb inklináción egyre vörösebb égitestek jellemzőek. Úgy tűnik, ez a jelenség közvetlenül a trójai kisbolygók kialakulásával áll kapcsolatban, és a Jupiter-Szaturnusz 2:1 rezonanciájának korszakára vezethető vissza. Az elmélet szerint a Jupiter ma megfigyelhető trójai kisbolygói külső tartományokból származnak, amelyek ekkor egy rövid időre elnyúlt, a Napot erősen megközelítő pályára álltak. Ebben a folyamatban a különböző pályahajlású égitestek eltérő ideig tartózkodhattak a Naphoz közel kerülő pályán, illetve különböző mértékben közelíthették meg a Napot, ami elvezethetett a ma megfigyelhető szín-inklináció korrelációhoz. Ha ez az interpretáció helyes, úgy a egész Naprendszer történetének megértéséhez is közelebb kerülhetünk egy lépéssel.  
(Szabó, Ivezić, Juric, Lupton, 2007)

2. Feldolgoztuk 23 főövbeli kisbolygó 1999 és 2003 között végzett CCD fotometriai méréseit. Közülük nyolcra a mi megfigyeléseink a legelsők a szakirodalomban. Vizsgálataink célja az égitestek rotációs periódusának meghatározása volt, amivel 10 kisbolygónál jártunk sikerrel. A mért periódusok 2,6 órától 13,36 óráig terjedtek. A 3682 Welther kisbolygó fénygörbéjében olyan rövid időskálájú elhalványodásokat találtunk, amit kísérő égitest (kisbolygó-hold) létezésével lehet magyarázni. A többi kisbolygó esetében a forgási periódusra és az alak elnyúltságára alsó becslést tudtunk adni.

(Székely, Kiss, Szabó et al., 2005)

3. Együttműködésben az Olasz Csillagászati Egyesülettel, és további szlovén, spanyol, francia és ausztrál amatőr csillagászokkal, elindítottunk egy üstökösmegfigyelési észlelőhálózatot (CARA, Cometary Archives for Amateurs, <http://cara.uai.it>). A program összegyűjti a fényesebb üstökösökről készült fotometriai méréseket, elsődleges célként a homogén és folyamatos adatok összegyűjtését tűzve ki célul. Kimutattuk, hogy e kettős célnak az Afp mennyiség CCD-kamerás megfigyelése felel meg a legjobban, ha az apertúrát hosszúság egységben rögzítjük. Meghatároztuk az adatok formátumát, és írtunk egy, kifejezetten az észlelőhálózat munkamódszeréhez illesztett, grafikus felületre írt képfeldolgozó programot (WinAfrho, XAfrho). Az észlelőhálózat 2002 nyaratól 2006. december 31-ig több, mint 4000 adatpontot gyűjtött össze 42 üstökösről (ebből 1000 adatpont

a Tempel 1 üstökösről). Az első adatok gyors analízise alapján az archívum minősége általában megfelelő a tudományos elemzés szempontjából. Az észlelőhálózat első két évének adatait feldolgoztuk és közzétettük; ez 8 üstökös vizsgálatát jelenti.

(Szabó, Milani, Vinante et al., 2006)

4. A Deep Impact szonda 2005. július 4-én megközelítette az üstökös magját, és 400 km távolságban elrepült mellette. Közben egy 615 kg súlyú lövedéket indított útjára, amely a magba csapódott. A szonda saját megfigyelései csupán órákig tartottak, az adatok értelmezéséhez fontos, hogy a hosszú távú hatásokat is vizsgáljuk. A Tempel 1 üstökös megfigyeléseit egybevetettük a korábbi láthatóságok publikált eredményeivel. 2005 január-február környékén fejlődött ki a kóma, amely májusra, a földközelség idejére 5 ívperc (75000 km) méretűre növekedett. Az üstökös fejlődését összevetve a korábbi (1983, 1987, 1994, 1997-2000, fotoelektromos és CCD) mérésekkel, a portermelés fejlődésének nagyfokú hasonlósága szembeötlő. Az üstökös kómájának szerkezete közepesen kompakt, -0.5 kétszer logaritmikus Afp meredekségű állapotból lassan egy "teljesen szabályos", 0 meredekségű kómává fejlődött. A becsapódás 1,3163 nappal a perihélium előtt történt. A becsapódáskor az Afp növekedését figyeltük meg, ennek mértéke elérte a 60%-ot, de pár nap múlva visszaállt a szokásos aktivitási szint. A becsapódás után 0,65, 0,94 és 1,93 nappal az Afp értéke 105 cm, 55 cm és 15 cm-rel volt a normál aktivitási szint fölött. Ezek alapján a portöbbség látszó felülete 8,2/A, 4,3/A, 1,2/A négyzetkilométer volt, ha A a porszemcsék albedója. (4% albedót feltételezve tehát 205, 108 és 30 négyzetkilométer.) A becsapódás a kóma szerkezetét is megváltoztatta. A logaritmikus profil hirtelen kissé kompaktabbá vált, 1,58, 1,64 és 5,61 nappal a becsapódás után értéke -0,28, -0,21 és -0,08 volt. Ezzel egy időben, július 4-én és 5-én egy legyező alakú felhőt figyeltünk meg a képeken, amely a becsapódás helye fölött emelkedett a magasba. Mivel ez a kóma-csóva vonalhoz képest oldalt helyezkedett el, látványosan elrontotta az üstökös addigi tengelyszimmetriáját. 4 nappal a becsapódás után már nem látszott nyoma a felhőnek. A felhő tágulását az Afp- $\rho$  görbék időfejlődésén is követni lehetett. Szökőkút-modell alapján a kezdeti sebesség 0,2 km/s körüli volt (vetületben), a  $\beta$  értéke pedig 0,7. A sebesség jó egyezésben van a DI adataival is, a  $\beta$  értéke pedig arra utal, hogy az általunk megfigyelt felhőben apró szemcsés (pár mikrométer méretű) por dominált. Bár a becsapódás után néhány napig az Afp kismértékben emelkedett szintjét figyeltük meg, az adatok alapján a becsapódás hatásai csak 4-5 napig voltak a kómában megfigyelhetők. Ennyi idő alatt a becsapódásra jellemző struktúrák szétesztlottak, és a kóma a korábbi állapotnak megfelelően viselkedett. Kis Afp változások ugyan adataink alapján nem zárhatóak ki, de ezek értéke bizonyosan nem érte el a 10-20% nagyságrendet.

(Milani, Szabó, Sostero et al., 2007)

## Exoholdak kimutathatóságának vizsgálata

1. Numerikusan szimuláltuk olyan exobolygó-rendszerek fénygörbéjét, amelyekben a bolygó körül hold is kering. Megállapítottuk, hogy a változócsillagok és tranzitos exobolygót tartalmazó rendszerek megfigyelésére tervezett űrprogramok (COROT, Kepler) várható pontossága lehetővé teszi, hogy a fénygörbe alapján a tranzitot produkáló bolygók körül keringő holdakra is lehet következtetni. Például a Kepler program 20% valószínűséggel tudná kimutatni a holdat, ha a Nap-Föld-Hold rendszer pontos mását figyelné meg mint tranzitos exobolygó-rendszert.

A szimulációk alapján kimutattuk, hogy a fénygörbén az eddig ismert effektuson túl (a bolygó keringése a közös tömegközéppont körül) egy második folyamat is nyomot hagy (a hold keringése a közös tömegközéppont körül). Ennek eredményeképpen a fénygörbe pontjai alapján számítható "timing effect", vagyis a fénygörbe időbeli csúszkálása általában sokkal nagyobb lehet, mint ahogy a korábban ismert effektus egyedüli figyelembe vételével adódna (a Föld esetében pl. 15,2 perc, a korábban számított 2,7 perc helyett).

500 rendszer alapján megvizsgáltuk a mai technikával valószínűleg megfigyelhető holdak paramétereit. Ezek a holdak a bolygótól elég távol keringenek, keringési idejük legalább 10 nap; a hold-bolygó rendszer a csillag körül pedig legalább 250 nap periódussal kering. Pozitív eredmény általában az 1 naptömegnél kisebb tömegű csillagok körül valószínű. A tervezett űreszközök a

jövőben több ilyen holdat is megfigyelhetnek, s az ismert "exoholdak" száma a következő évtized végére a pár tucatot is elérheti.

(Szabó, Szatmáry, Simon, Divéki, 2005, Szabó, Szatmáry, Divéki, Simon, 2006)

2. Kidolgoztunk egy olyan módszert, amellyel az exoholdak tömegét és sugarát lehet mérések alapján meghatározni tranzitos fotometriai adatok alapján. A rendszerre jellemző fénygörbe vizsgálatával olyan analitikus közelítő formulákat vezettünk le, mellyel jól megbecsülhető a holdak tömege és sugara. Az eredmények szerint a fedés középideje pontosan egybeesik egy jól definiált fotometria középpont áthaladásával; a középideje a hold hatására úgy módosul, mintha a fotometria középpont keringene a tömegközéppont körül. Az időpont-eltolódás nagysága függ a bolygó és hold tömegétől, sugarától, valamint kettőjük sűrűségarányától. A három paraméter közül kettő független, ezért megbízható sűrűségarány-becslés esetén megbecsülhető az exohold tömege és sűrűsége. A modellt teszteltük a Naprendszerünkben a Föld-Hold párosra, amint elhaladnak a Napunk előtt. Azonos sűrűséget feltételezve Holdunk tömegére 0,020 Föld-tömeget, sugarára 0,274 Föld-sugarat kaptunk, mely jól közelíti a valóságot egy 2-es faktoron belül. Valós sűrűségarányt (kb. 0,6) véve az eredmény 0,010 Föld-tömeg és 0,253 Föld-sugár. Ezen eredmények a valós értékektől kevesebb, mint 20%-ban térnek el.

(Simon, Szatmáry, Szabó, 2007)

## Kozmológiai vizsgálatok

1. A jelenleg elérhető szupernóva-adatokat összevetettük a  $\Lambda$ CDM-modell valamint alternatív gravitációelméletek jóslataival, azt találva, hogy az adatok jelenlegi halmaza nem elegendő a helyes elmélet kiválasztásához. Az alternatív elméletek az ún. brán-világok osztályába tartoznak, melyekben a három+egy dimenziós téridő (brán) egy ötdimenziós, görbült sokaságba ágyazható. Az öt dimenziós Weyl-görbület forrásként jelenik meg világunkban. A lehetséges modellek csekély mértékű Weyl-folyadékot tartalmazhatnak, a közönséges plusz sötét anyag rovására. Amennyiben a brán és az ötödik dimenzió között nincs energiacsere, a Weyl-görbület ún. sötét sugárzásként jelenik meg. Ebben az esetben a szupernóva-adatok alapján a sötét sugárzás 4%-át adja az univerzum energiatartalmának. Amennyiben a brán sugárzik, lokális minimum nem határozható meg megbízhatóan. A lehetséges modellek eltérése az  $\Lambda$ CDM modelltől kisebb. Vizsgálatainkhoz analitikusan levezettük a luminozitás-vörösetolódás összefüggést a vizsgált brán-világok osztályára. (Keresztes, Gergely, Nagy, Szabó, 2007, Szabó, Gergely, Keresztes, 2007)

2. Megvizsgáltuk az égboltfelmérési technikák fejlődését és hatékonyságát a Naprendszer, a Galaxis és a világegyetem nagyléptékű szerkezetének megértésében. Az összehasonlításba tizenhét égboltfelmérést vontunk be, Hipparkhosz csillagkatalógusától a tervezett Pan-STARRS és Large Synoptic Survey Telescope kísérletekig. Szinte a teljes elektromágneses hullámhossztartomány lefedhető a rendelkezésre álló égboltfelmérésekkel, amelyek segítségével rengeteg objektum spektrális energiaeloszlása, felbontott esetben különböző hullámhosszakon látható megjelenése vethető össze egymással. A hosszú időskálájú változások megfigyelésére különösen alkalmas a különböző égboltfelmérések összehasonlítása, hiszen nagy számú objektum homogén adatsorairól van szó. (Szabó, 2006)

## Konferencia-részvétel, tanulmányutak

### 2003:

A 2003-as évben két konferencián mutattuk be eredményeinket. Kiss László és Derekas Alíz a Nemzetközi Csillagászati Unió 193. kollokviumán (cím: Variable stars in the Local Group) vett részt Christchurchben (Új-Zéland), egy előadással és egy poszterrel. Szatmáry Károly a budapesti JENAM 2003 konferencián (cím: New Deal in European Astronomy: Trends and Perspectives) vett részt poszterrel, ugyanezen a konferencián Szabó Gyula meghívott előadóként tartott előadást (Highlight Talk) "New Results in Understanding the Small Bodies of the Solar System" címmel. Kiss László és Székely Péter (V. éves csillagász hallgató) megjelent a Nemzetközi Csillagászati

Unió 25. közgyűlésének rendezvényein is (Sydney, Ausztrália), amihez más pályázatok támogatásait is fel kellett használni.

Szabó Gyula Spanyolországban (Observatory of Mallorca) és Olaszországban (Asiago), Csák Balázs és Székely Péter Ausztráliában (Siding Spring) volt tanulmányúton illetve méréseket végezni.

#### **2004:**

Kiss László és Derekas Alíz az "Annual Scientific and General Meeting of the ASA, University of Queensland, 4-8 July 2004, Australia" konferencián vett részt előadással és poszterrel.

Balog Zoltán 2004.09.22.-2004.10.02. között tanulmányúton volt a SAO Fred Lawrence Whipple Observatory, Amando, Arizona, USA intézetben, ahol a következő témákkal foglalkozott: Beágyazott halmazok feltérképezése közeli IR-ben, Cepheus-beli PMS csillagok spektroszkopiai vizsgálata. 2004.10.06.-2004.10.12. között a "Cores to Clusters" nemzetközi konferencián vett részt (Porto, Portugália), ahol 2 posztert mutatott be.

Szabó Gyula az USA-ban (Princeton University) 5 hétig az SDSS égboltfelmérő program adatfeldolgozásában vett részt, Olaszországban (Arcetri Osservatorio) és Horvátországban (Crni Vrh Obs.) a CARA üstökös adatbázis munkabizottságában tevékenykedett. Mészáros Szabolcs és Székely Péter Ausztráliában (University of Sydney, Siding Spring Observatory) volt kb. 1 hónapos tanulmányúton illetve méréseket végezni. Csák Balázs 2004 novemberétől egy évig a Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA, USA) intézetben végezte PhD tanulmányait illetve kutatásait. Ebben az intézetben volt tanulmányúton Major Csaba is, és Arizonában spektroszkopiai méréseket végzett.

#### **2005:**

Kiss László, Derekas Alíz és Székely Péter júniusban a római "Stellar pulsation and evolution" konferencián vett részt előadással és poszterrel. Szabó Gyula májusban az Arcetri obszervatóriumban (Olaszország) tett látogatást és részt vett a CARA 2005 évi találkozóján; június-augusztus hónapokban a Johns Hopkins University-n és a CfA (USA) intézetben volt tanulmányúton, utóbbin előadást is tartott. Mészáros Szabolcs 2005 októberétől a CfA-ben végzi PhD tanulmányait illetve kutatásait. A Szegedi Tudományegyetem összes csillagász kutatója, PhD ösztöndíjasa és számos csillagász szakos hallgatója részt vett (több előadással és poszterrel) szeptemberben a pécsi "Astrophysics of Variable Stars" PhD konferencián. Szatmáry Károly a poszter-zsűri felkért tagja volt. Kilenc fővel (és 3 előadással) vettünk részt az ELFT Csillagász Szakcsoportja által a Bakonyban megrendezett Őszi Csillagász Iskolán.

Rendszeresen kaptunk távcsőidőt, így méréseket végezhetünk az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete piszkéstetői obszervatóriumában, amit hálásan köszönünk.

#### **2006-2007. jún.:**

2006 januárjában többen előadásokkal is részt vettünk a budapesti "4<sup>th</sup> Workshop of Young Researchers in Astronomy & Astrophysics" találkozón. Szabó Gyula Dubrovnikban előadást tartott az Astronomical Image Processing Workshop-on ("Image Processing in Cometary Astronomy"), április 10-én pedig a First Hungarian AKARI Meeting-en, Budapesten ("Solar System Small Bodies Observations with Sky Surveys – MID-IR Perspectives"). Székely Péter a Magyar Állami Eötvös Ösztöndíj támogatásával 4 hónapot Sydney-ben töltött. Szalai Tamás a 2006. július-augusztusi időszakban tanulmányúton vett részt a CfA (USA) intézetben. Jurkovic Mónika, Sziládi Katalin és Vinkó József szeptemberben részt vett a "Precision Spectroscopy in Astrophysics" konferencián (Aveiro, Portugália). Jurkovic Mónika és Székely Péter előadott a "From Our Star to Far Stars: Variation and Variability - British-Hungarian-French N+N+N Workshop for Young Researchers" budapesti találkozón 2007 januárjában. Vinkó József februárban Aspen-ben (USA) tartott előadást a "Supernova 1987A: 20 Years After - Supernovae and Gamma-Ray Bursters" konferencián. Szabó Gyula január-február során a Magyar Zoltán Felsőoktatási Közalapítvány támogatásával a University of Sydney School of Physics-ben töltött négy hetet tanulmányúton, továbbá 2007 júniusában részt vett a "VI Serbian Conference on Spectral Line Shapes" konferencián Karlócán (Sremski Karlovci), és egy poszterrel szerepelt Görögországban az "Extreme Solar Systems" exobolygós konferencián.

## Műszerfejlesztések

2006-ban a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövét Cassegrain típusról Newton rendszerűre alakítottuk át, így nagyobb lett a látómező. A távcső új, villás szerkezetű mechanikára került, amely számítógéppel vezérelt. A CCD kamera elé Robofókusz berendezést építettünk be. Átépítettük az obszervatórium földemjét is, kialakítottunk egy észlelőteraszt.

## Tudományos fokozatok, oktatási tevékenység

Kiss László 2006-ban benyújtotta értekezését az MTA doktora cím elnyerésére (védés 2007 őszén).

A pályázat idején 2 PhD értekezés készült és került megvédésre:

Balog Zoltán: 2005, A csillagfejlődés korai szakasza fiatal galaktikus nyílthalmazokban,

PhD értekezés, SZTE, Szeged

Szabó M. Gyula: 2005, Kisbolygók és üstökösök fizikai paramétereinek meghatározása fotometriai módszerekkel, PhD értekezés, SZTE, Szeged

A 2003-2007 közötti időszakban a következő szakdolgozatok, diplomamunkák (SZD) és tudományos diákköri (TDK) dolgozatok készültek a pályázathoz kapcsolódó témakörökben:

1. Kistömegű vörös óriáscsillagok hélium-héjának fellobbanására utaló periódusváltozás vizsgálata

Bebesi Zsófia csillagász (tv. Szatmáry Károly) 2003, TDK

2. Pulzáló vörös óriáscsillagok fényváltozásának idő-frekvencia analízise

Bebesi Zsófia csillagász (tv. Szatmáry Károly) 2003, SZD

3. Alulészlelt kisbolygók CCD-fotometriája

Székely Péter csillagász (tv. Kiss László) 2003, TDK

4. Érintkező kettőscsillagok fejlődésének modellezése

Mészáros Szabolcs csillagász (tv. Vinkó József) 2003, TDK

5. Az NGC 2126 nyílthalmaz fotometriai vizsgálata

Gáspár András csillagász (tv. Kiss László) 2003, TDK

6. Nóvakitörések spektroszkópiája és fotometriája

Gögh Noémi fizikus (tv. Kiss László) 2003, TDK

7. Távolságmérés szupernóva robbanások segítségével

Sipőcz Brigitta középiskolás (tv. Vinkó József) 2003, TDK

8. Érintkező kettőscsillagok fejlődésének modellezése

Mészáros Szabolcs csillagász (tv. Vinkó József) 2004, SZD

9. Alulészlelt kisbolygók CCD-fotometriája

Székely Péter csillagász (tv. Kiss László, Szatmáry Károly) 2004, SZD

10. Forró szubtörpe csillagok és szubtörpe-fősorozati kettőscsillagok vizsgálatai

Németh Péter csillagász (tv. Kiss László, Szatmáry Károly) 2004, SZD

11. Nóvakitörések spektroszkópiája és fotometriája

Gögh Noémi fizikus (tv. Kiss László, Szatmáry Károly) 2004, SZD

12. Cassegrain spektrográf tervezése a pizskéstetői csillagvizsgáló 1 m-es távcsövére

Major Csaba csillagász (tv. Fűrész Gábor) 2004, TDK

13. II. típusú cefeida csillagok légkörének kinematikája

Jurkovity Mónika csillagász (tv. Vinkó József) 2004, TDK

14. Az NGC 189 és az IC 1413 nyílthalmazok fotometriai vizsgálata

Makai Zoltán csillagász (tv. Csák Balázs, Balog Zoltán) 2004, TDK

15. Beágyazott csillaghalmazok feltérképezése a közeli infravörös tartományban

Gáspár András, Makai Zoltán csillagász (tv. Balog Zoltán) 2004, TDK

16. Forró emissziós csillagok spektroszkópiája

Szaniszló Erika csillagász (tv. Kovács József, konz. Szatmáry Károly) 2005, SZD

17. Kisbolygók többszín-fotometriai megfigyelése

Csapó Balázs csillagász (tv. Szabó Gyula, Szatmáry Károly) 2005, SZD

18. Fősorozat előtti csillagok spektroszkópiái vizsgálata

Major Csaba csillagász (tv. Kun Mária, konz. Szatmáry Károly) 2005, SZD

19. Modulált rövidperiódusú pulzáló változócsillagok fotometriai vizsgálata

Váradi Mihály csillagász (tv. Jurcsik Johanna, konz. Szatmáry Károly) 2005, SZD

20. II. típusú cefeida csillagok légkörének kinematikája  
Jurkovity Mónika csillagász (tv. Vinkó József) 2006, SZD
21. Csillagok luminozitási osztályának meghatározása a CaII triplett vonalak segítségével  
Ékesné Balogh Renáta csillagász (tv. Vinkó József) 2006, SZD
22. Beágyazott csillaghalmazok feltérképezése a közeli infravörös tartományban  
Gáspár András csillagász (tv. Balog Zoltán, konz. Vinkó József) 2006, SZD
23. Galaktikus nyílthalmazok fotometriai vizsgálata  
Makai Zoltán csillagász (tv. Csák Balázs, Vinkó József) 2006, SZD
24. Szoros déli kettőscsillagok fizikai paramétereinek meghatározása  
Szalai Tamás csillagász (tv. Mészáros Szabolcs, Vinkó József, konz. Kiss L. László) 2006, TDK
25. Szupernóvák távolságának meghatározása Tárguló Fotoszféra Módszerrel  
Takáts Katalin csillagász (tv. Vinkó József) 2006, TDK
26. Az LO Pegasi mágneses aktivitásának finomléptékű vizsgálata  
Csorvási Róbert csillagász (tv. Oláh Katalin, konz. Szatmáry Károly) 2006, TDK
27. "Exoholdak" sugarának, tömegének és sűrűségének meghatározása fedési rendszerekben  
Simon Attila csillagász (tv. Szabó Gyula, Szatmáry Károly) 2006, TDK
28. A sugárzás terjedése szupernóva-atmoszférákban  
Takáts Katalin csillagász (tv. Vinkó József) 2007, SZD
29. Egy magányos törpecsillag aktivitása  
Csorvási Róbert csillagász (tv. Oláh Katalin, konz. Szatmáry Károly) 2007, SZD
30. Pulzáló SRd csillagok vizsgálata  
Kötél László csillagász (tv. Szatmáry Károly) 2007, SZD
31. "Exoholdak" sugarának, tömegének és sűrűségének meghatározása fedési rendszerekben  
Simon Attila csillagász (tv. Szabó Gyula, Szatmáry Károly) 2007, SZD

Részletek, a publikációk adatai a Szegedi Csillagvizsgáló honlapjain: <http://astro.u-szeged.hu>

Kutatásaink széleskörű hazai és nemzetközi együttműködések keretében valósultak meg.

A jelen OTKA pályázat számának feltüntetésével 35 folyóiratcikket és 18 konferencia anyagot publikáltunk, összesen 150,459 impakt faktossal. Ezekre eddig 43 független hivatkozás történt.

Szeged, 2007. 08. 11.

Szatmáry Károly  
témavezető